

国际工程科技发展战略高端论坛

International Top-level Forum on Engineering Science
and Technology Development Strategy

中國工程院

CHINESE ACADEMY OF ENGINEERING

核电站地震安全

SEISMIC SAFETY OF
NUCLEAR POWER
PLANT

国际工程科技发展战略高端论坛

International Top-level Forum on Engineering Science
and Technology Development Strategy



CHINESE ACADEMY OF ENGINEERING

核电站地震安全

hedianzhan dizhen anquan

SEISMIC SAFETY OF NUCLEAR POWER PLANT



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书全面介绍2012年中国工程院主办的“国际工程科技发展战略高端论坛——核电站地震安全”的背景、讨论内容和结论,并汇编了论坛的全部技术资料,包括中外与会院士和专家们在论坛的报告以及在圆桌会议上的讨论内容和结论。这些报告和讨论反映了当今世界各国核电站在地震安全保护技术方面的科研、设计与建造的经验 and 成果,对核电站地震安全问题进行了深入探讨,提出了许多前瞻性的建议和对策。

本书可供从事核电站建设的科研、设计、施工和管理人员参考,也可供有关高等院校的教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

核电站地震安全 : 汉英对照 / 中国工程院编著. --
北京 : 高等教育出版社, 2013.12
(国际工程科技发展战略高端论坛)
ISBN 978-7-04-038556-4

I. ①核… II. ①中… III. ①核电站—抗震性能—研究—汉、英 IV. ①TM623

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第234300号



总策划 樊代明

策划编辑 王国祥 黄慧靖

责任编辑 沈晓晶

封面设计 顾 斌

责任印制 韩 刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京汇林印务有限公司
开 本 850 mm×1168 mm 1/16
印 张 16.5
字 数 300千字
插 页 1
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
版 次 2013年12月第1版
印 次 2013年12月第1次印刷
定 价 80.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 38556-00

International Top-level Forum on Engineering Science and Technology Development Strategy
—Seismic Safety of Nuclear Power Plant
国际工程科技发展战略高端论坛——核电站地震安全

合影留念
Nov. 21-23, 2012 Guangzhou China



国际工程科技发展战略高端论坛——核电站地震安全参会专家合影（2012. 11. 21-23）

论坛组织委员会

主 任： 周福霖 谢礼立

委 员(按姓氏拼音字母顺序排序)：

陈永亨 陈运泰 杜祥琬 Frieder Seible

冯 元 傅继阳 黄剑涛 黄学清

李兴华 毛 庆 茹继平 束国刚

徐 进 谢学宁 庾建设

秘书处： 唐海英 秦 春 崔 杰 谭 平

文小菲 徐 丽

目 录

第一部分 综述

综述.....	3
---------	---

第二部分 参会专家名单

参会专家名单.....	13
-------------	----

第三部分 主题报告及报告人简介

中文报告

核电站安全的地震威胁及对策分析.....	周福霖	19
对我国核能发展战略的思考.....	杜祥琬	27
将核电站反应堆置于地下的设想.....	陆佑楣	29
日本东北 MW9.0 地震与海啸的经验教训.....	陈运泰	36
福岛核事故后中国广东核电集团核电厂抗震设计和评估进展.....	毛 庆	38
核电厂工程结构抗震研究进展.....	孔宪京	49
核电站核安全相关结构基于性能指标的抗震概率设计评估方法探究	陈 矛	70
中国核电工程场地设计地震动参数确定相关问题.....	李小军	78
福岛核事故后中国大陆沿海核电站地震和海啸危险性复核研究.....	常向东	91
核电厂的抗震设计输入及 AP1000 核岛隔震课题简介.....	夏祖颀	93
优化设计输入和分析方法以提高核电厂抗震安全性.....	张超琦	102

英文报告

Seismic Hazard Mitigation for Nuclear Power Plant.....	Frieder Seible	115
Seismic Design and Analysis of nuclear Power Plant Structures	Pentti Varpasuo	131

Seismic Considerations for Spent Nuclear Fuel Storage in Dry Casks	Susan Y. Pickering	153
Nuclear Power Plant Life Extension: How Aging Affects Performance of Containments & Other Structures.....	Robert A. Dameron	174
Severe Accident Risks from External Events.....	Randall O. Gauntt	203
Seismic Base Isolation System French Background and Experience Feed-back	Emmanuel Viallet	219
Checking of Seismic and Tsunami Hazard for Coastal NPP of Chinese Continent after Fukushima Nuclear Accident.....	Chang Xiangdong	225
Keep Stopped, Keep Cooling, Keep Sealed off.....	Akira Wada	237
Fukushima Accident Study Using MELCOR.....	Randall O. Gauntt	240
后记		255

第一部分 综 述

综 述

一、论坛背景

积极发展核电,是我国能源的长期重大战略选择,它将成为我国清洁能源长期发展的一个重要支柱。目前,我国核电装机容量910万kW,仅占全国总发电量的2%,与全球核电国家平均17%(其中,有17个国家的核电在本国发电量中的比例超过25%)相比有很大差距。根据预测,我国2020年的核电装机容量将比目前增长9~10倍。预计未来20~30年,核电站将在我国各地区成批兴建。

但是,核电站仍可能面临地震安全隐患。2007年7月16日日本新潟县M6.8级地震,引发柏崎刈羽核电厂多个装有放射性废料的罐子倾倒、含放射性物质的水泄漏等事故,敲响了全球核电站地震安全的警钟!令人深省的是日本福岛核电站遭遇“3·11”地震和海啸造成核泄漏,令世人“谈核色变”!世界各国对建设核电站都在重新反思。我国怎么办?各国都在探讨。高度重视抗震的日本核电厂(其设计地震输入为民用建筑的3倍)尚存在地震安全问题,将要快速发展核电的我国更要从中警醒!我国目前设计的CPR1000核电站,其设计运行安全地震地面震动限于0.2g。若在像汶川、玉树等原属中低烈度地震区(设计地震动为0.10~0.15g)突发了强地震(实际地震动达0.60~0.96g),对核电站造成的后果是不堪设想的!

核电工程技术复杂,核电的批量化、规模化发展,将对其安全性提出更高的要求。我国国土面积60%~80%以上处在地震区,地震危险性预测存在不确定性,断层活动具有可变性、新生性和潜伏性。如何确保核电站在突发强地震中的安全,避免后果不堪设想的地震核灾难,已成为急待解决的重要课题。核电发展瓶颈之一是如何解决核电站的地震安全问题。因此有必要从战略高度探讨核电站地震安全性的前景、途径、对策和存在极限。制定我国核电站地震安全的战略对策。

论坛广邀国内外核电工程、地震工程、结构工程、防震减灾工程界的知名专家及院士,围绕核电站在大地震中的重大安全问题和对策及核电站在地震和海啸中的安全保护技术和科研、设计与建造等方面的创新成果,开展多方位、多角度的战略性与前瞻性主题研讨,通过多学科交叉与融合探求核电站地震安全保护技术的策略及可行性,为国家或地区科学制定核电发展规划和地震安全的长期战略方

针提供咨询建议;促进地震(海啸)中核电站安全保护理论和技术进步与发展,提高地震(海啸)中核电站的安全性;并推动国际间的合作与交流,共同为保护人类的核安全做出新的贡献!

二、论坛整体情况

在论坛各方的共同努力下,“国际工程科技发展战略高端论坛——核电站地震安全”于2012年11月21-23日在广州白云国际会议中心举行。论坛由中国工程院主办,中国工程院土木、水利与建筑工程学部,广州大学减震控制与结构安全国家重点实验室(培育),中国广东核电集团有限公司共同承办,并得到国家自然科学基金委员会、中国地震局、广州市科学技术协会的大力支持。



会议面向核电站地震安全方面的重大科技问题开展高端性、宏观性、综合性、战略性研讨,论坛设置了大会特邀报告和一场主题圆桌高端研讨会。具体围绕以下主题:

- 1)核电站在大地震中的重大安全问题和对策;
- 2)地震多发国家或地区的核电发展前景和长期发展战略;
- 3)地震或海啸对核电站安全的严重威胁和灾害评估;
- 4)核电站遭遇地震灾害的历史经验和教训;
- 5)核电站选址及选型对地震安全性的影响及其限制;
- 6)保证核电站不同物项运行安全的极限地震动(OBE和SSE)的合理确定(峰值、特性等);
- 7)核电站遭遇超大地震或海啸的安全对策;
- 8)隔震减震技术在核电站中的应用探讨;

9)核电站地震监测及地震预警系统;

10) 已建核电站地震安全的改善措施和核电站延寿安全措施。

出席会议、作特邀报告和参加圆桌会议研讨的有10位院士:中国工程院雷志栋院士、周福霖院士、谢礼立院士、杜祥琬院士、陆佑楣院士、王梦恕院士、罗绍基院士、郑健超院士,中国科学院陈运泰院士,美国工程院、中国工程院外籍院士Frieder Seible(美国加利福尼亚大学圣地亚哥工程学院院长);10位外国著名专家:美国工程院院士、中国工程院外籍院士Frieder Seible,东京工业大学Akira Wada(和田章)教授,法国电力公司(EDF)Emmanuel Viallet博士,芬兰FORTUM工程公司资深抗震分析与设计专家Pentti Varpasuo博士,美国能源部Sandia国家实验室Randall O. Gauntt博士,美国能源部Sandia国家实验室核能源安全技术组Susan Y. Pickering博士,美国Moffatt & Nichol公司的Robert A. Dameron等,以及国家环境保护部核与辐射安全中心副总工程师常向东研究员、国家核电技术公司国核电力规划设计研究院副院长陈矛研究员级高级工程师、大连理工大学孔宪京教授、中国地震局地球物理研究所副所长李小军研究员、中广核工程设计有限公司总工程师毛庆博士、广东粤铁瀚阳科技有限公司董事长孙峻岭博士、上海核工程研究设计院技术顾问及土建总设计师夏祖讽教授(兼任国家核安全局核安全专家委员会委员)、中国核电工程有限公司副总工程师张超琦研究员级高工、温州大学蔡袁强校长(杰出青年基金获得者)、湖南大学风工程研究中心主任陈政清教授、北京工业大学院长杜修力教授(长江学者特聘教授)、兰州理工大学杜永峰教授、中国科学院武汉岩土力学研究所国际岩石力学学会主席冯夏庭研究员、中国工程院二局高中琪副局长、东南大学李爱群教授(杰出青年基金获得者)、大连理工大学李宏男教授(长江学者特聘教授)、哈尔滨工业大学李惠教授(长江学者特聘教授)、天津大学/天津城市建设学院李忠献教授(长江学者特聘教授)、河海大学刘汉龙教授(长江学者特聘教授)、郑州大学王复明教授(杰出青年基金获得者)、华南理工大学吴波教授(长江学者特聘教授)、国家“千人计划”特聘专家尹学军教授、中国科学院武汉岩土力学研究所李海波所长(杰出青年基金获得者)、国家基金委工程与材料科学部茹继平处长等。周福霖院士、谢礼立院士担任大会主席。

大会开幕式由广州大学工程抗震研究中心副主任谭平研究员主持,周福霖院士、谢礼立院士担任此次会议的组织委员会主任并出席会议。论坛主席周福霖院士、中国工程院原副院长杜祥琬院士、广东省副省长陈云贤、广州市副市长王东出席会议并分别代表论坛组委会和有关政府部门致辞表示祝贺。

会议历时两天。11月22-23日上午,与会专家学者围绕核电站地震安全作了精彩的特邀报告。其中,大会主席周福霖院士作了《核电站安全的地震威胁及对

策分析》的主题报告,分析了我国目前核电站的建设现状以及其安全所面临的地震威胁,着重探讨了确保核电站地震安全的有效途径——隔震技术,并提出了一些思考和建议。美国工程院、中国工程院外籍院士塞泊院士对核电站减震方面进行了讲演,分别阐述了美国核电站及核废料储存的现状与核电厂选址情况,论述了核电站防泄漏、防爆炸、核废料储存以及整个系统防震的重要意义,同时初步探讨了隔震技术的可行性。杜祥琬院士对我国核能发展战略进行了探讨,首先详细探讨了中国能源结构发展的三个阶段:由化石能源为主、多元结构阶段到核能等非化石能源为主,其次介绍了我国在福岛事故以后对核电站开展的安全大检查情况,并对长远发展核电提出了一些建议。芬兰FORTUM工程公司资深抗震分析与设计专家Pentti Varpasuo先生在核电站的抗震设计和分析方面进行了探讨,介绍了分析核电地震安全性的一些方法。陆佑楣院士介绍了一种将核电站反应堆置于地下的新思路,把核电站的反应堆装在山体里面,如果出现核泄漏可以封闭在地下,等于是给核电站的安全壳增加一个屏障,也可把常规岛放在地面,并通过多个水电站实例论述这种思想的可行性、经济性等,引起了大家的强烈反响。陈运泰院士就日本东北Mw9.0地震与海啸灾害情况,系统总结了我国在地震动研究方面的经验与教训。美国能源部Sandia国家实验室Susan Y. Pickering女士介绍了地震对核废燃料干贮存的影响、国家实验室的反应堆安全壳研究情况。环境保护部核与辐射安全中心常向东研究员介绍了在福岛事故之后,中国核安全当局开展的中国沿海核电厂面临地震海啸风险的复核研究成果。中广核设计公司总工程师毛庆博士讲述了中广核在福岛事故之后,对核电厂抗震设计和评估方面的一些工作,包括对福岛事故以前抗震设计方面的一些介绍和以后所采取的行动。Robert A. Dameron介绍了核电站的寿命延长、老化的问题及结构抗震评估等问题。大连理工大学孔宪京教授、美国能源部Sandia国家实验室Randall O. Gauntt博士、国家核电技术公司国核电力规划设计研究院陈矛副院长、法国电力公司(EDF)Emmanuel Viallet博士、中国地震局地球所副所长李小军研究员、上海核工程研究设计院夏祖谏教授、中国核电工程有限公司副总工程师张超琦研究员级高工等也就核电厂工程结构抗震研究进展、隔震设计、核电厂场地设计地震动参数取值、优化设计和分析方法等突出问题分别作了精彩的报告。

11月23日下午,论坛主席周福霖院士、谢礼立院士以及Frieder Seible院士共同主持了核电站地震安全未来科技发展战略主题圆桌高端研讨会。研讨会围绕核电站在大地震中的重大安全问题和对策、地震或海啸对核电站安全的严重威胁和灾害评估、核电站选址及选型对地震安全性的影响及其限制、核电站遭遇超大地震或海啸的安全对策、隔震减震技术在核电站的应用探讨、核电站地震监测及

地震预警系统等问题,从国际视野进行了研讨,探讨未来的研究、合作,共同分享核电站在地震和海啸中安全保护技术方面科研、设计与建造等科技创新成果,共同探讨核电站抗震、隔震减震、监测及报警方面的科学技术难题,为加强中国与世界核电站技术的交流,促进地震(海啸)中核电站安全保护理论和技术的进步与发展,提高地震(海啸)中核电站的安全性,推动国际间的合作与交流,搭建了一个高水平、高层次的交流平台。与会的中外院士和专家进行了精心准备,积极发言,并达成了一系列共识。

三、会议主要观点和结论

会议经过两天的报告和研讨,与会专家面向未来提出了许多前瞻性的建议和措施,形成了如下主要观点和结论。

1)核电仍是我国能源的重大战略选择,它是我国清洁能源的重要支柱,环保、清洁;核电是高效、低成本的能源,其长期成本远低于太阳能,仅为风电成本的50%,仅为火力发电成本的30%;目前我国核电装机容量仅占全国总发电量的不足2%,远低于世界核电国家核电装机容量平均占有值17%,更低于17个核电国家核电装机容量占有值25%;核电是我国能源的长期可持续发展战略选择,在我国有很大发展空间,核电站将在中国继续兴建和快速发展。

2)安全第一,是核电未来发展的生命线,确保核电站的安全,再如何强调都不为过,特别是确保核电站的地震安全。要总结和吸取世界各国几次核泄漏的事故,特别是日本福岛核电站7级严重核泄漏事故的经验教训。由于世界各国(包括中国)地震有越发频繁的趋势,超预测的大地震频繁发生,如果仍按20世纪的抗震标准和技术设计和建造核电站,将面临地震安全的隐患。

3)中国核电站的地震安全问题尤为突出。中国处于世界两个地震带的交汇点,地震区占国土面积的80%以上;中国的陆地占世界的1/14,但破坏性地震占了世界的1/3;中国地震有潜伏性、新生性、可变性的特点,灾难性的超烈度大地震多发生在原预测划分为中低烈度地震区,2008年汶川地震,该地区原设防烈度为7度,地震地面运动原定为0.10g,实际发生的地震烈度为10~11度,实测到的地震地面运动达0.6~0.9g,超过6~9倍,必然造成大灾难!如果核电站参照某地区的设防标准进行抗震设计,是存在突发大地震导致核灾难的隐患的!

4)中国核电站建设处于开始阶段,如果采取正确战略决策,采用成熟、有效的隔震技术,结合性能设计,可以利用后发优势,建成世界上地震安全性最高的一批新核电站,迅速站在建设安全先进核电站的世界前沿。

已沿袭300年的传统抗震技术,采用加强结构“硬抗”地震,当发生的地震在

预测烈度之内,仍可做到房屋不倒塌,保护人的生命,但室内设备仪器仍遭破坏。当发生的地震超过预测烈度,则房屋将严重破坏或倒塌,造成地震大灾难!我国邢台地震,唐山地震,海城地震,汶川地震,玉树地震,芦山地震……一次次重复大灾难!

近40年来发展起来的隔震技术,即在结构底部设置一道有足够承载能力的“柔软层”(隔震层),地震发生时,该隔震层能隔离60%~90%的地面震动,建筑物像漂浮在柔软的隔震层上,不管地震有多大,建筑物及室内的设备仪器,均安然无恙,即中国哲学的“以柔克刚”。该技术已在理论、试验等方面做了深入研究,并投入工程应用(我国已建近4000栋房屋,日本、美国已建5000多房屋),并成功经历近期历次大地震考验(美国加州大地震,日本阪神大地震、“3·11”东海大地震,中国汶川地震、芦山地震等),凡是采用隔震技术的房屋,结构和内部设备仪器均完好无损,从仪器记录可知,大地震中,隔震房屋的加速度反应仅为传统抗震房屋的 $1/4 \sim 1/12$ 。地震越大,隔震效果越明显,就像地震中的“安全岛”。目前,该技术已是成熟技术,已有设计规范、产品标准、产品制造、检测规程等配套,在国内外推广应用。某些国家(日本、美国等)和我国某些省市(云南省等)已要求学校、医院、指挥中心、重要实验室等安全要求高、在地震中其运用功能不能中断的重要建筑必须采用隔震技术。我国已在一些大型、复杂的建筑中成功采用隔震技术(像结构复杂的昆明新机场,面积达50万平方米,长度达400m)。

核电站由于其重要性,对改变传统的新技术的采用,一直持非常慎重的态度。但由于传统抗震技术的安全性已不能满足要求,而隔震技术又表现出其成熟、有效和安全性的大幅提高,因此隔震技术应用于核电站,在本次论坛中已得到国内外权威专家的肯定,并预言将成为提高核电站地震安全性的未来发展趋势!

国外已建成两个采用隔震技术的核电站(法国 Cruas,南非 Koeberg),一个采用隔震技术的核电站正在施工(法国 Cadarache),有三个采用隔震技术的核电站正在设计中(法国 Cadarache,韩国 Kalimer,美国 Galena),另有几个拟建的新核电站都决定采用隔震技术。国外大批核电站均建于20世纪,当时苦于隔震技术尚未十分成熟,只能采用传统抗震技术,至今对地震安全问题仍忧心忡忡(日本核电原占30%,至今仍未达2%),他们当时没有遇到好机遇。中国很幸运,在将要大建核电站时,对核电站地震安全具有革命性影响的隔震技术已经十分成熟,历史机遇就在面前!

如果抓住这个机遇,采取正确战略决策,在新核电站建设中,采用成熟、有效的隔震技术,建成世界上地震安全性最高的一批新核电站,将迅速站在建设安全先进核电站的世界前沿,为人类和子孙后代做出贡献!

5)建设地下核电站。有专家建议,把核电站建于地下,一可减少结构对地面运动的放大作用;二可降低核事故在地面的扩大影响。这是一个有创新性的建议。值得考虑和研究。

6)对已建核电站地震安全性的评估、鉴定和加固。该工作很重要,要进一步深入研究。

四、论坛意义

本次高端论坛目的明确,针对性强,出席会议的有较多世界顶级专家,具有很强的代表性,研讨问题重点突出。本次高端论坛取得的成果,确定了我国未来核电站地震安全领域的重点发展方向,凝练了确保核电站地震安全研究领域需要重点组织研究的若干重大科学技术问题,探讨了核电站在大地震中的重大安全问题和对策,提出了很多创新思想和科学问题,可为国家或地区科学制定核电发展规划和地震安全的长期战略方针提供咨询建议,促进地震(海啸)中核电站安全保护理论和技术的进步与发展,提高地震(海啸)中核电站的安全性,推动国际间在核电领域的合作与交流具有重要的意义。

